

А.Г.ПРИЙМАКОВ, канд.техн.наук, ХУВС;
А.В.УСТИНЕНКО, канд.техн.наук, НТУ «ХПИ»

ВЫБОР ДОПУСКАЕМЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ

Дано критеріальну оцінку порівняльної зносостійкості матеріалів з урахуванням структурної адаптації до умов середовища. Кількісно оцінений рівень анізотропії й складність структурного стану поверхонь абразивного зношування за допомогою Фур'є-аналізу. Показано, як здійснити вибір допустимих напруг при наявності абразиву в зоні тертя.

The criteria estimation of comparative endurance of materials is given in view of structural adaptation to conditions of a working environment. The level of an anisotropy and complexity of a structural condition of surfaces of abrasive chafing, with the help of the Fourier-assaying is quantitatively estimated. It is shown how to realize a choice of supposed stress at presence of an abrasive in a friction zone.

Введение. В машиностроении при выборе допускаемых напряжений необходимо учитывать факт практически неизбежного абразивного изнашивания поверхностей трения контактирующих тел из-за попадания абразива или продуктов износа в зону контакта. Кроме того, по мере изнашивания меняется уровень анизотропии свойств и ориентации блоков структуры поверхности трения, что, в свою очередь, изменяет ее уровень напряженно-деформированного состояния. Очевидно, эти процессы требуют количественной и качественной оценки и учета при выборе допускаемых напряжений.

Анализ литературы. Анализ литературных источников, [1-11], показывает, что в такой постановке данная задача решается впервые; имеются лишь разрозненные данные справочного характера.

Цель статьи. Таким образом, целью статьи служит разработка и описание способа рационального определения допускаемых напряжений в условиях и с учетом абразивного изнашивания поверхностей трения.

Критерий оценки работы в условиях абразивного изнашивания. Использование различных концепций в моделировании процесса изнашивания материалов привело к созданию полумпирических выражений, которые на протяжении последней четверти века составляют основную расчетную базу для проведения оценок изнашивания. Это связано, во-первых, с достаточной простотой использования полученных зависимостей и, во-вторых, с возможностью качественного и количественного анализа процесса изнашивания. В основу этих моделей, часто простроенных на основе физических соображений с учетом теории размерностей, легли следующие предположения:

- износ пропорционален пути трения;
- износ пропорционален работе сил трения;
- износ определяется физическими параметрами процесса и механическими свойствами материалов.

Выбор сочетания материалов по результатам сравнительных испытаний на износостойкость в значительной степени обоснован обусловленностью критерия оценки относительной износостойкости. Следует заметить, что универсального критерия, который бы мог охватить все разнообразие материалов, видов износа и т.д. нет, за исключением, пожалуй, критериев, полученных в рамках общего термодинамического подхода. При разработке такого критерия наиболее эффективным, с нашей точки зрения, является концептуальный подход. Не рассматривая всех концепций, принятых на сегодняшний день в трибологии, остановимся на энергетическом подходе, в рамках которого В.Д.Кузнецовым [1] для оценки относительной износостойкости предложен критерий, связывающий величину износа с работой силы трения. Рассмотрим данный критерий с позиции применения для оценки абразивного износа.

В.Д.Кузнецов [1] под интенсивностью изнашивания I понимал величину износа детали или образца металла, проходящегося на единицу работы силы трения:

$$I = \frac{V}{\mu p L}, \quad (1)$$

где V – износ материала твердого тела за время опыта; μ – коэффициент трения; p – нормальная нагрузка; L – путь трения.

В качестве критерия оценки относительной износостойкости принята удельная работа изнашивания A_u , представляющая отношение работы A , затраченной на удаление массы Δn , к этой массе:

$$A_u = \frac{A}{\Delta n}, \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{М}}{\text{М}^3} \right]. \quad (2)$$

Эта величина наиболее тесно связана с истинной (физической) твердостью материала при трении и в полной мере характеризует процесс диспергирования материала при абразивном износе.

Следует отметить, что данный критерий не может быть использован для раскрытия самого механизма изнашивания, учесть влияние теплового, реологического, химического, масштабного факторов. Для раскрытия механизма изнашивания целесообразно рассматривать функцию износа в зависимости от этих факторов.

В нашем случае сравнительный анализ износостойкости проводится при фиксировании масштабного и физико-химического факторов. К масштабному фактору следует отнести размер испытываемых образцов и размеры абразивных частиц. К физико-химическому фактору следует отнести рабочую среду, которая при сравнительных испытаниях различных материалов также фиксировалась.

Известно [1-4], что относительная абразивная износостойкость материалов зависит также от соотношения твердостей абразива H_a и металла H_m . При $H_a < kH_m$ в диапазоне $k = 0,7 \dots 1$ износ незначительный, при $H_a > kH_m$ в диапазоне $k = 1,3 \dots 1,7$ относительная износостойкость не зависит от твердости абразива.

В качестве допущения принимаем соблюдение второго условия для всех материалов при всех сочетаниях испытываемых пар трения. Достижение этого

условия, по сути, является реализацией принципа структурной адаптации материалов в условиях абразивного изнашивания с учетом состава и свойств рабочей среды.

Наиболее обоснованным в оценке абразивного износа, на наш взгляд, является подход, принятый в работе В.А.Войтова [11]. Суть данного подхода заключается в распределении парциального теплового потока между элементами трибосопряжений, который определяет величину износа каждого из элементов, а также величину суммарного износа трибосопряжения.

Различие в подходах заключается в критериальной оценке величины теплового потока. В первом случае тепловой поток формируется изменением теплового сопротивления каждого из элементов, обусловленного физико-механическими свойствами поверхностного слоя и параметрами микрорельефа (шероховатостью R_a). Во втором случае парциальное распределение тепла достигалось соотношением объемов элементов трибосопряжения и площадей контакта, а физико-механические свойства учитывались делением пар трения на прямые и обратные.

Не рассматривая достоинств и недостатков каждого из подходов, отметим один общий, на наш взгляд, недостаток такого подхода. Он заключается в не учете явления структурной адаптации за счет изменения реологических характеристик материалов трибосопряжения. При абразивном износе микрорельеф и реология материалов формируется за счет механического взаимодействия абразивных частиц и компонентов рабочей среды, в которых они находятся.

Структурообразование при абразивном износе обусловлено процессами упрочнения и разупрочнения поверхностей трения, которые, по сути, являются регулятором в балансе подводимой и рассеиваемой энергии. Таким образом, принятый нами подход в большей степени соответствует работам [4, 8], в которых рассматривается проблема адаптации материалов к внешним динамическим воздействиям.

Для случая абразивного изнашивания между энергетическими критериями износостойкости материала [10] и его твердостью можно принять наличие прямой корреляции $HV/A_{\text{во}} = C = \text{const}$. Справедливость этого выражения рассматривается в рамках принятых допущений. С учетом изменения твердости как подвижного, так и неподвижного образца в процессе приработки линейный износ подвижного образца I_1 , неподвижного образца I_2 и суммарный износ I_{1+2} будет зависеть от изменения микротвердостей каждого из элементов трибосопряжения.

Введем безразмерный коэффициент структурной адаптации, который для неподвижного и подвижного элементов трибосопряжения представлены выражениями

$$K_{ca1} = \frac{H_{01}}{H_{K1} - H_{01}} ; \quad (3)$$

$$K_{ca2} = \frac{H_{02}}{H_{K2} - H_{02}} , \quad (4)$$

где H_{01} и H_{02} – начальные значения твердости подвижного и неподвижного образцов соответственно; H_{K1} и H_{K2} – значения микротвердостей, достигнутые после приработки подвижным и неподвижным образцом соответственно.

При постоянном режиме трения и износа приработанных тел линейный износ подвижного и неподвижного образцов и суммарный износ могут быть записаны в частном случае:

$$I_1 = \frac{C}{H_a} K_{ca1} \frac{1}{S_1} N f V_C t ; \quad (5)$$

$$I_2 = \frac{C}{H_a} K_{ca2} \frac{1}{S_2} N f V_C t ; \quad (6)$$

$$I_{1+2} = \frac{C}{H_a} \frac{S_2 K_{ca1} + S_1 K_{ca2}}{S_1 S_2} N f V_C t , \quad (7)$$

где H_a – твердость абразива; N – нагрузка; f – коэффициент трения; V_C – скорость скольжения; t – время испытаний; S_1 и S_2 – площади рабочих поверхностей подвижного и неподвижного образцов соответственно.

Величина

$$K_{ca} = \frac{S_2 K_{ca1} + S_1 K_{ca2}}{S_1 S_2} \quad (8)$$

названа нами коэффициент структурной адаптации трибосопряжения. Он формирует парциальное распределение теплового потока между рабочей абразивной средой и элементами пары трения. Тепловой поток в свою очередь является сигналом обратной связи в саморегулирующей системе через упрочнение и разупрочнение поверхностей трения в трибосопряжении. В отличие от коэффициентов K_{ca1} и K_{ca2} коэффициент K_{ca} величина размерная [1/м] и имеет такую же размерность, как и коэффициент формы в работе В.А. Войтова [11]. С учетом первого множителя эта величина характеризует диссипацию внешней подводимой энергии по тепловому каналу.

Согласно экстремальным принципам термодинамики необратимых процессов, устойчивость стационарного состояния соответствует минимуму работы диссипативных сил и характеризует максимум скорости порождения энтропии. При этом под скоростью порождения энтропии понимается ее поток, передаваемый окружающей среде.

Данная величина может быть как положительной, так и отрицательной величиной. Если $K_{ca} > 0$, то данное трибосопряжение адаптируется к условиям абразивной среды. Если $K_{ca} < 0$, то такая адаптация не происходит, и в таком сочетании материалов в данной абразивной среде трибосопряжение будет работать с повышенным износом в режиме микрорезания.

Таким образом, K_{ca} является объективным критерием оценки работы конструкционных материалов в условиях абразивного изнашивания.

Исследование поверхностей трения при помощи Фурье-анализа. Для качественной и количественной оценки уровня анизотропии свойств и слож-

ности структурного состояния в условиях абразивного изнашивания наиболее эффективен Фурье-анализ поверхностей трения [7, 10].

Следует отметить, что для проведения Фурье-анализа авторы использовали единственную пока на Украине лабораторную установку Института электросварки им. Е.О.Патона Национальной АН Украины (г. Киев). Особый интерес представляет программа SIA 1.00, адаптированная авторами для выбора допускаемых напряжений.

В данной программе анализируется двухмерный Фурье-спектр. Различные участки структуры по-разному отражают сканирующий луч, что и служит причиной изменения регистрируемого сигнала.

Данная программа работает в двух режимах. В первом режиме количественно оценивается уровень анизотропии и ориентации блоков структуры относительно главных действующих напряжений с помощью автокорреляционного и спектрального анализа фрактограмм поверхности. Во втором режиме качественно по ширине и сложности фрактограммы оценивается сложность структурного состояния (количество коэффициентов в уравнении Фурье), степень анизотропии главных действующих напряжений и количественная оценка степени упорядоченности структуры на поверхности трения (фазовый анализ). По математическому ожиданию и величине средней мощности оптической плотности устанавливается принадлежность спектральной плотности к конкретным фазам исследуемой структуры.

Задачу нахождения угла ориентации элементов изображения (ЭИ) относительно избранного направления, совпадающего с осью абсцисс (программа SIA 1.00), можно интерпретировать, как задачу нахождения оси некоторого замкнутого однородного тела, относительно которой осевой момент инерции минимален.

Известно, что момент инерции тела относительно оси равняется
$$I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2,$$

где r_i – расстояние от i -й точки с массой m_i до оси. Плоскость, ограниченную некоторым замкнутым контуром, можно представить как совокупность ограниченного

числа точек с единичными массами. Тогда
$$I = \sum_{i=1}^n r_i^2.$$

Таким образом, приходим к задаче нахождения такой прямой, относительно которой сумма квадратов отклонений всех точек плоской фигуры была бы минимальной.

При прямом сканировании электронного луча по поверхности изображения определяется угол между осью инерции и осью абсцисс каждого из ЭИ. При обратном сканировании для указанных геометрических признаков рассчитывается гистограмма длин хорд ЭИ для каждого из выделенных на изображении угловых диапазонов (от 0 до 180° с интервалом в 10°) (рис. 1). Гистограмму строят путем подсчета числа попаданий случайной величины (в этом случае – длин осей инерции ЭИ) в заданные разряды. Статистический анализ ориентации ЭИ обобщен главным вектором ориентации ЭИ относительно выбранного направления сканирования, соединенного с осью абсцисс.

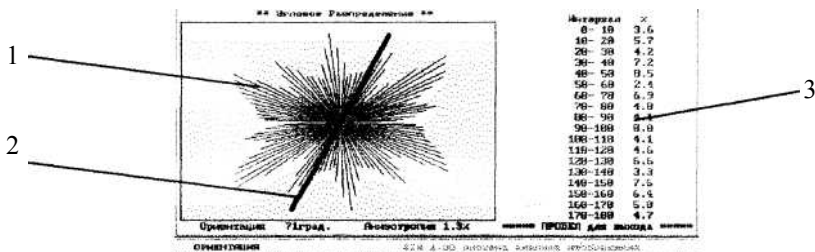


Рисунок 1 – Гистограмма ориентации ЭИ, построенная с помощью SIA 1.00:
 1 – длины хорд ЭИ для каждого углового диапазона; 2 – главный вектор ориентации структурных ЭИ; 3 – количество блоков структурных составляющих для каждого углового диапазона, %

Анализ сложности структурного состояния и реологических особенностей поверхности трения проводили по двумерному дифракционному спектру (ДДС). Он определяет усредненные размеры структурных составляющих, расстояние между ними, концентрацию, длину межфазовых границ и позволяет исследовать анизотропию структуры в целом, связанную с анизотропией оптических, механических и др. свойств. Интенсивность ДДС определяется выражением

$$I_{\text{ДДС}}(H_x; H_y) = \left[\frac{A}{\lambda f} \int \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2\pi i(H_x x + H_y y)} I_{\text{об}}(x, y) dx dy \right],$$

где $I_{\text{ДДС}}$ – интенсивность ДДС в единицах оптической плотности; $H_x = \alpha N$; $H_y = \beta N$ – координаты точек на плоскости ДДС; α , β – направляющие косинусы; A , λ – амплитуда и длина волны излучения; f – коэффициент, учитывающий увеличение электронно-растрового изображения; $I_{\text{об}}(x, y)$ – функция, характеризующая распределение интенсивности ДДС анализируемой поверхности.

Как один из признаков, количественно характеризующих структуру по электронно-растровому изображению, использовалось среднее значение частоты \bar{r}_x , определяемое по формуле $\bar{r}_x = \Delta r_i / N$, где Δr_i – интервал пространственных частот ДДС в области диапазона от минимального до максимального размера структурных составных анализируемой поверхности; N – число «пикув» в данном интервале пространственных частот.

Графически результаты двумерного дифракционного анализа представляют зависимости дифференциальной частотной характеристики $I_{\text{ДЧХ}}$ от среднего значения частоты \bar{r}_x (рис. 2).

Данная зависимость отображает изменение формы, размера и расстояния между элементами изображения в избранном направлении, т.е. среднее значение \bar{r}_x отображает усредненный морфологический параметр исследуемой поверхности (ее анизотропию).

Результаты сравнительного анализа гистограмм поверхности при одинаковых увеличениях и направлении сканирования на электронно-растровом изображении позволяют оценивать характер расположения и размер элемен-

тов структуры в избранном направлении, и производить сравнительную оценку анизотропии исследуемых поверхностей по ширине гистограммы и количеству максимумов на ней.

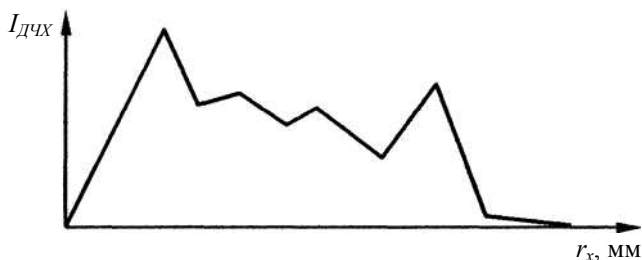


Рисунок 2 – Изображение двумерного дифракционного анализа поверхности, полученное с помощью программы SIA 1.00

Одновременно с анализом анизотропии поверхности трения проводился качественный анализ ее текстурированности по фоновым признакам: яркость, размер, форма, пространственная ориентация.

Текстурированность характеризует ориентацию напряжений по границам структурных составляющих. В программе SIA 1.00 она оценивается с помощью двумерной матрицы смежности по пространственной взаимосвязи значений яркости элементов изображения, размещенных для каждого углового направления.

Параметры текстуры вычисляются из матрицы смежности, и их численные значения зависят от дисперсности изображения. Грубодисперсная структура характеризуется группами граничащих точек с одинаковой или близкой оптической плотностью (яркостью), вследствие чего, небольшие вероятности перехода группируются на диагонали матрицы или вблизи нее.

Отсутствие диагонали матрицы свидетельствует о псевдоаморфном состоянии поверхности изображения с отсутствием четкой ориентации напряжений по границам структурных составляющих. И наоборот, наличие четко сгруппированных точек относительно диагонали матрицы свидетельствует об ориентации межфазных границ, а, следовательно, и напряжений (рис. 3).

Группировки характеризуются коэффициентом анизотропии $\eta = c/d$. Если $\eta \approx 1$ – поверхность изотропная; если $\eta \rightarrow \infty$ – максимально анизотропная. Количество точек на плоскости сканирования связано с величиной структурной энтропии, оцениваемой по параметру $\sum_{ij} P_{ij} \log P_{ij}$.

Рентгеновский и оптико-структурный методы объединяет следующее допущение: главные направления эллипсоида деформации совпадают с осями координат объекта в пределах отражающего слоя. Отличает эти два метода то, что в первом случае количественно определяем величину напряжений, усредненную на определенную глубину, а во втором – получаем качественную картину распределения напряжений по поверхности.

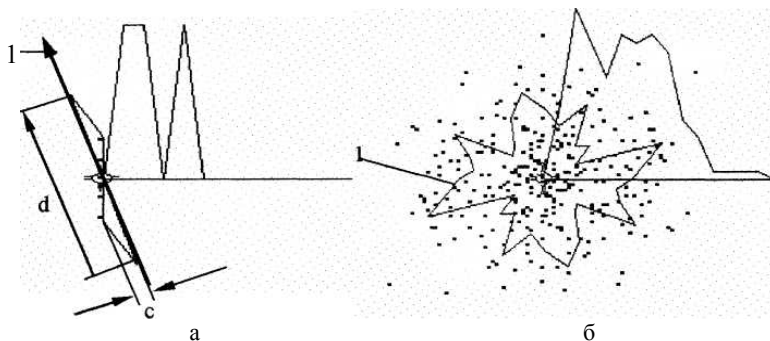


Рисунок 3 – Графическое изображение оценки текстурированности и ориентации напряжений поверхности, полученное с помощью программы SIA 1.00 (а – анизотропная поверхность, б – изотропная поверхность):
 l – направление ориентации напряжений

Совсем другую картину дал оптико-структурный метод (рис. 4). Вектор главных действующих напряжений на образцах, обработанных в соответствии с математической статистикой, развернут перпендикулярно к направлению трения, значительно увеличилось количество мелких объектов (рис. 4, б). А после месячного простоя этой пары трения резко выросшая анизотропия ориентации поверхностных напряжений, их результирующий вектор развернулся под углом $\approx 45^\circ$ к направлению трения (рис. 4, в).

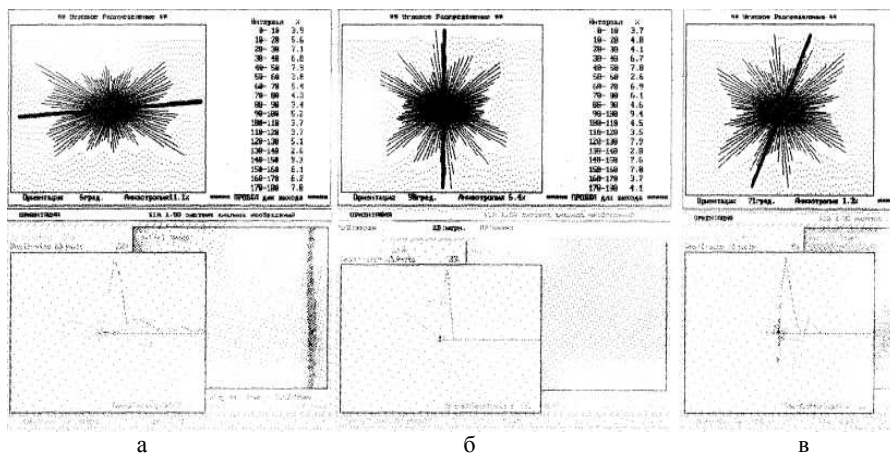


Рисунок 4 – Ориентация блоков и анизотропия структуры поверхностного слоя в процессе модифицирования ревитализантом (программа SIA 1.00):
 а – обычная пара трения; б – модифицированная пара трения через 1 час после обработки; в – через 30 суток простоя после модифицирования

Завершая работу, авторы сделали следующие выводы:

1. При выборе допускаемых напряжений конструкционных материалов,

работающих в условиях абразивного изнашивания, следует эквивалентные напряжения, действующие на поверхности трения, домножать в соответствии с рекомендациями [1, 2] на коэффициент структурной адаптации трибосопряжения K_{ca} и коэффициент достигнутой анизотропии η .

2. Коэффициент структурной адаптации K_{ca} является объективным показателем работы трибосопряжений в условиях абразивного изнашивания.

3. Изменение анизотропии свойств, реологические и синергетические явления, и, связанное с ними изменение НДС поверхности трения, определяется коэффициентом анизотропии η , для определения которого и разработана универсальная программа SIA 1.00.

Список литературы: 1. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с. 2. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1988. – 712 с. 3. Качанов Д.М. Основы механики разрушений. – М.: Наука, 1974. – 311 с. 4. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 399 с. 5. Григорьев Ю.П. Сопротивление материалов и строительная механика авиационных конструкций. – М.: Воен. изд. МО СССР, 1977. – 512 с. 6. Приймаков А.Г. Усталостные испытания силовых трехволновых зубчатых передач с металлополимерными гибкими колесами // Проблемы трения и изнашивания. – 1985. – Вып. 27. – С. 48-51. 7. Приймаков А.Г. Применение ускоренных методов испытаний на выносливость волновых зубчатых передач // Теория механизмов и машин. – 1990. – № 48. – С. 39-44. 8. Приймаков О.Г., Молякко О.И. Втомленість авіаційних конструкцій та засоби її попередження // Інтегральні технології та енергозбереження. – 2002. – № 1. – С. 32-41. 9. Приймаков О.Г., Лисяк О.О., Приймаков Г.О. Прогнозування надійності та довговічності авіаційної техніки // Вестник науки и техники. – 2003. – № 1. – С. 12-19. 10. Приймаков О.Г., Бобровицький О.В., Приймаков Г.О. Витривалість кольорових сплавів та її експериментальні дослідження // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2002. – Вып. 14. – С.155-161. 11. Войтов В.А. и др. Конструктивная износостойкость узлов трения гидромашин. – Харьков: изд. Центра им. Л.Курбаса, 1996. – 140 с.

Поступила в редколлегию 28.04.2006

УДК 681.3

И.Г.СУВОРОВА, докт.техн.наук;
С.С.ХОЛОБЦЕВ; ИПМаш НАН Украины

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СЛОЖНОПОЛОСТНЫХ СИСТЕМАХ

Математична модель течії в'язкої нестискаємої рідини, збудована методом R – функцій та її комп'ютерна реалізація, дозволила в рамках системи ПОЛЕ провести чисельне дослідження в гідродинамічних каналах із складним профілем, отримати якісні картини течії, оцінити вплив чисел Рейнольдса (Re)

The mathematic model current of the tough incompressible fluid and her computer realization in POLE system allowed making the numerical research into hydrodynamics canals with compound profile building by R-function method. Qualitative pictures currents are received. The influence of Reynolds number (Re) is valued.

Над формулировкой основных уравнений движения вязкой жидкости, представляющих математическую модель законов сохранения импульса и